

И. В. Нарыгина*, М. С. Карабаналов, А. Г. Илларионов, П. С. Радаев

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

*i.v.narygina@urfu.ru

СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОМ СПЛАВЕ ТИТАНА VT22 ПРИ СТАРЕНИИ

Методами РЭМ, РСФА и микродюрометрии изучено изменение структуры, фазового состава и свойств при старении в прутках из сплава VT22, предварительно закаленных из β - или $(\alpha+\beta)$ -области и холоднодеформированных с различными степенями обжатия.

Ключевые слова: титановый сплав, структура, микротвердость, закалка, холодная деформация, старение.

I. V. Narygina, M. S. Karabanalov, A. G. Illarionov, P. S. Radaev

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATION IN A COLD-WORKED TITANIUM ALLOY VT22 DURING AGING

The change of structure, phase composition and properties during aging in bars of alloy VT22, pre-hardened from β - or $(\alpha+\beta)$ -region and cold deformed with different degrees of compression, was studied by methods of SEM, x-ray diffraction analysis and microdurometry.

Key words: titanium alloy, structure, microhardness, quenching, cold deformation, aging.

Высокопрочный $(\alpha+\beta)$ -титановый сплав переходного класса VT22 (Ti—5,52Al—4,94Mo—4,86V—1,11Fe—1,04Cr—0,11O (мас. %)) является перспективным для применения в силовых тяжело нагруженных конструкциях авиакосмической техники в деталях шасси, фюзеляжа, крыла самолета, крепежных деталях типа силовых болтов за счет высокой удельной прочности, вязкости, коррозионной стойкости, прокаливаемости и высокой надежности при эксплуатации.

Эффект упрочнения при старении сплавов переходного класса определяется дисперсностью и характером распределения в структуре продуктов распада метастабильного твердого раствора. Использование холодной пластической деформации (ХПД) между обработкой на твердый

раствор и старением приведет к формированию в структуре дислокаций и других деформационных дефектов. Это позволяет модифицировать зарождение выделяющейся при старении α -фазы [1, 2], а значит, улучшить микроструктуру и повысить комплекс механических свойств. В связи с этим целью настоящего исследования явилось изучение процессов, протекающих в ходе старения закаленного и холоднодеформированного сплава ВТ22.

Материалом для исследования служили горячекатаные прутки $\varnothing 15$ мм из промышленного сплава ВТ22, изготовленного на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Цилиндрические заготовки из прутков ($\varnothing 15$ мм \times 15 мм) были подвергнуты обработке в β -области при 950 °С ($T_{\text{мн}} + 100$ °С) или в $(\alpha + \beta)$ -области при 830 °С ($T_{\text{мн}} - 30$ °С) в течение 1 ч с закалкой в воду, затем ХПД осадкой вдоль направления оси прокатки с различными степенями обжатия ε и последующему старению в интервале температур 500–650 °С с шагом 50 °С в течение 4 ч.

Согласно данным РЭМ установлено, что в ходе старения распад метастабильного β -твердого раствора идет с образованием вторичной α -фазы в виде пакетов пластин нескольких ориентаций в одном β -зерне (рис. 1, *а–г*). При этом закалка из β -области (рис. 1, *в, г*) приводит к формированию более упорядоченной характерной «зигзагообразной» структуры при старении с большим средним размером α -пластин, чем закалка из $(\alpha + \beta)$ -области (рис. 1, *а, б*). Это вызвано большим размером рекристаллизованного β -зерна.

С помощью метода РСФА выявлено, что повышение температуры старения ($T_{\text{стар}}$) как после закалки с 830 °С, так и с 950 °С способствует закономерному уменьшению физического уширения α -линий (с 0,71 до 0,46 и с 0,8 до 0,47 градусов соответственно), а также повышению отношения параметров c/a кристаллической решетки α -фазы (с 1,588 до 1,593 и с 1,591 до 1,593 соответственно). Это свидетельствует об образовании менее дефектной α -фазы с большим содержанием алюминия при более высоких $T_{\text{стар}}$, что согласуется с данными работ [3, 4]. Объемная доля вторичной α -фазы снижается с повышением $T_{\text{стар}}$, что приводит к обеднению β -твердого раствора β -стабилизирующими элементами и росту периода решетки β -фазы (с 0,319 до 0,320 нм для обеих температур закалки).

Формирование более крупных пластин α -фазы и увеличение объемной доли β -твердого раствора в структуре с повышением $T_{\text{стар}}$ в сплавах, закаленных как с 830 °С, так и с 950 °С, способствует снижению микротвердости (с 5830 до 4370 МПа и с 5830 до 4580 МПа соответственно). Однако общий уровень микротвердости в сплаве, закаленном с 950 °С,

выше, чем в сплаве, закаленном с 830 °С, вследствие большей объемной доли $\alpha_{\text{вторич}}$ -выделений при старении.

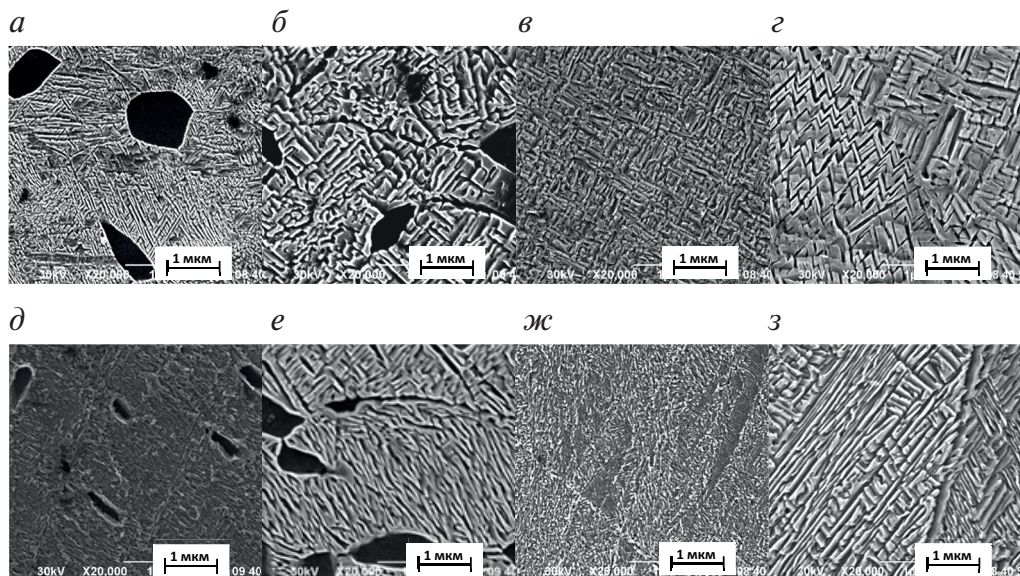


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ22, закаленного из $(\alpha+\beta)$ -области с температуры 830 °С (*а, б, д, е*) или из β -области с температуры 950 °С (*в, г, ж, з*) и деформированного со степенями обжатия 0 % (*а–г*), 6 % (*д, е*), 16 % (*ж, з*), после старения при температурах 500 °С (*а, в, д, ж*) и 600 °С (*б, г, е, з*)

Морфология выделения α -частиц при старении в закаленном из β -и $(\alpha+\beta)$ -области сплаве при ХПД со степенями обжатия до 2 % сохраняется. Обжатие заготовок до 6 и 16 % приводит к уменьшению размеров формирующихся при старении α -пластин (рис. 1, *д–з*). Это обусловлено повышением плотности дефектов кристаллического строения в β -твердом растворе, увеличением протяженности межфазных границ при образовании деформационно-индуцированных фаз (τ , α'') в ходе ХПД [5], а значит, возрастанием количества мест зарождения α -фазы. Выделяющиеся α -пластины не всегда прямолинейны, чаще они изогнуты и имеют неправильную форму (рис. 1, *д–з*), при этом с повышением температуры закалки с 830 до 950 °С межпластинчатое расстояние при соизмеримых степенях обжатия закаленных сплавов несколько возрастает.

Как и в закаленном состоянии, после ХПД рост отношения c/a кристаллической решетки α -фазы с повышением температуры старения сохраняется (рис. 2).

Фиксируемый уровень c/a несколько изменяется от степени деформации, что связано с разной полнотой распада β -твердого раствора и образованием деформационно-индуцированных фаз.

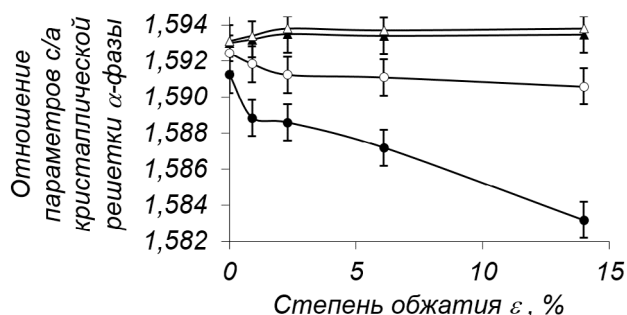


Рис. 2. Отношение c/a решетки α -фазы после старения при различных температурах в зависимости от степени обжатия сплава, закаленного из $(\alpha+\beta)$ -области:

—●— 500 °C; —○— 550 °C; —▲— 600 °C; —△— 650 °C

Тенденция к повышению периода кристаллической решетки β -фазы с увеличением $T_{\text{стар}}$ сохраняется также при воздействии предварительной до старения деформации с любой степенью обжатия. Это значит, что выбранная для старения 4-часовая выдержка обеспечивает достаточно полное протекание процессов распада как в закаленных, так и в деформированных сплавах с формированием $(\alpha+\beta)$ -структуры с близким к равновесному составом фаз.

Характер изменения микротвердости в зависимости от степени деформации зависит как от температуры старения, так и от температуры закалки (рис. 3).

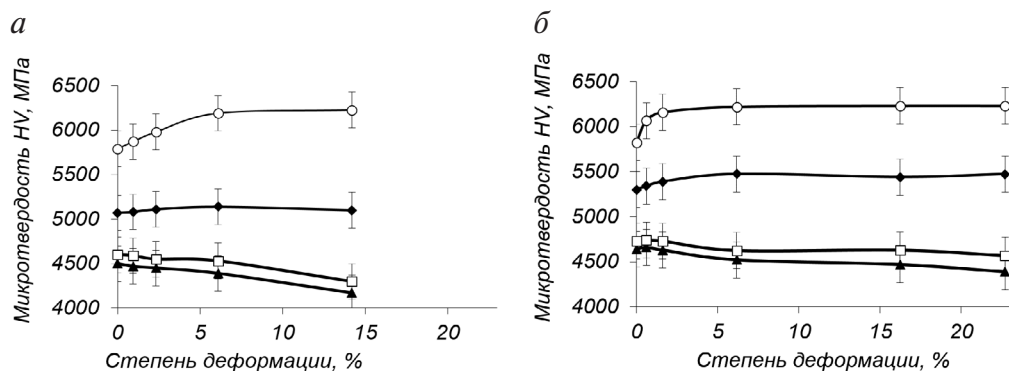


Рис. 3. Изменение микротвердости в зависимости от степени ХПД сплава VT22, предварительно закаленного с температуры:

а — 830 °C; б — 950 °C; —▲— 650 °C; —□— 600 °C; —◆— 550 °C; —○— 500 °C

При температурах старения 600, 650 °C некоторое снижение дюрометрических характеристик с увеличением степени деформации связано с развитием процессов коагуляции выделяющихся α -частиц в сильно

деформированных сплавах. При 550 °С разупрочнение за счет коагуляции α -частиц менее значительно из-за более низкой температуры и компенсируется упрочнением β -матрицы за счет предварительной ХПД, что обеспечивает постоянный уровень микротвердости при различных степенях деформации. В ходе старения при 500 °С прочность растет при малых степенях деформации из-за деформационного упрочнения β -матрицы, а выход на постоянный уровень при более высоких степенях связан с теми же причинами, что и при старении при 550 °С. Общий уровень микротвердости при старении после закалки с 950 °С выше, чем после закалки с 830 °С, из-за большей объемной доли вторичных α -выделений ввиду отсутствия первичных α -частиц.

Таким образом, показано, что повышение температуры закалки горячекатаных в ($\alpha+\beta$)-области прутков из сплава ВТ22 с 830 до 950 °С способствует получению более высоких дюрометрических характеристик в закаленном и холоднодеформированном сплавах при одинаковых температурах старения за счет большей объемной доли продуктов распада.

Проведение ХПД перед старением приводит к изменению морфологии α -выделений при степенях деформации свыше 6 %. Характер изменения дюрометрических характеристик со степенью деформации при старении определяется развитием процессов разупрочнения сплава за счет развития процессов коагуляции частиц вторых фаз и разупрочнения в результате деформационного наклепа и интенсификации выделения α -частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00220).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сравнительный анализ высокопрочных состояний в титановых β -сплавах / О. М. Ивасишин [и др.] // Титан. 2004. № 2. С. 24–37.
- 2 Попов А. А. Структура и свойства титановых сплавов. В 2 ч. Ч. 1. Процессы формирования структуры. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 138 с.
- 3 Abolikhina O. V., Antonyuk S. L., Molyar O. H. Structure, strength and plasticity of semifinished products of VT22 titanium alloy // Materials Science. 2008. Vol. 44, № 3. P. 400–404.
- 4 Влияние технологических факторов на структуру и механические свойства крупногабаритных лопаток из сплава ВТ22 / Л. А. Орлова [и др.] // Технология легких сплавов. 1993. № 9. С. 67–74.
- 5 Структурные и фазовые превращения в титановом сплаве переходного класса при деформационном воздействии / А. Г. Илларионов [и др.] // ФММ. 2010. Т. 110, вып. 3. С. 295–304.